

**Министерство науки и высшего образования Российской Федерации**  
**федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Российский государственный университет нефти и газа (национальный исследовательский университет) имени И.М. Губкина»**

**(РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина)**

119991, г. Москва, Ленинский просп., д. 65, корп. 1, телефон: (499) 507-88-88 (многоканальный)  
ОКПО 02066612; ОГРН 1027739073845; ИНН/КПП 7736093127/773601001  
E-mail: [com@gubkin.ru](mailto:com@gubkin.ru); <http://www.gubkin.ru>



**«УТВЕРЖДАЮ»**

Проректор по научной работе

к.т.н., доцент

**П. К. Калашников**

«14» *mdh* 2024 г.

### **ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ**

на диссертационную работу Кулешовой Екатерины Михайловны  
«Повышение износостойкости червячных передач посредством применения наномодифицированного смазочного материала», представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.5.3. Трение и износ в машинах

#### **Общая характеристика работы**

Диссертационная работа состоит из введения, 4 глав, заключения, списка литературы из 104 наименований, 1 приложения. Общий объем диссертации – 145 страниц, 55 рисунков и 13 таблиц.

Автореферат полностью отражает содержание диссертации.

Диссертация и автореферат соответствуют областям исследования паспорта научной специальности 2.5.3. Трение и износ в машинах.

#### **Актуальность темы исследования**

Основной целью диссертационной работы Кулешовой Е.М. является повышение износостойкости червячных передач за счет применения наномодифицированной добавки к смазочному материалу, что позволило существенно расширить параметрические границы червячной передачи и увеличить срок ее службы. Сложность поставленной цели обуславливается

необходимостью разработки математических моделей для расчета интенсивности изнашивания, температуры и толщины смазочного слоя, коэффициента динамичности, оценки параметрических границ триботехнической работоспособности. Основное назначение разработанных моделей для оценки ресурса смазочного материала, модифицированного нанодобавкой типа «Стрибойл», заключается в создании смазочных масел для червячных передач, обладающих оптимальными антифрикционными и противоизносными свойствами, существенно увеличивающими срок их службы.

Следует сказать, что на данный момент отсутствует комплексная методика оценки динамики изнашивания червячных передач, позволяющая оценивать ресурс функционирования пар трения в смазочных маслах с нанодобавками, в связи с чем, представленная к экспертизе работа Кулешовой Е.М. является востребованной и весьма актуальной.

### **Анализ содержания диссертации**

Во введении обоснована актуальность, сформулированы цель и задачи работы, положения, выносимые на защиту. Отмечены научная новизна, теоретическая и практическая ценность работы.

В первой главе приведены обзор работ в области применения червячных передач и анализ существующих методов повышения износостойкости и улучшения динамики изнашивания червячных передач.

Червячные передачи применяют для передачи средних и малых мощностей (от долей киловатта до 30 кВт) и используются при значительных (от 8 до 63...80) передаточных числах. Широкое применение червячных передач обусловлено их компактностью, относительно небольшой массой конструкции, высокой кинематической точностью, а также бесшумностью и плавностью работы, возможностью получения самотормозящей передачи.

Одной из основных причин выхода из строя червячных передач является их изнашивание, в связи с тем, что в отличие от других видов передач, в червячном зацеплении существенную роль играет трение скольжения, преимущественно в области смешанной смазки. Как известно, одним из способов увеличения износостойкости сопряжений скольжения является увеличение толщины смазочной пленки (более чем суммарная высота шероховатостей сопрягаемых деталей). Процессы пленкообразования при использовании наномодифицированных смазочных материалов протекают на коллоидном, наноструктурном уровне и могут сопровождаться формированием в паре трения скольжения склонности к снижению коэффициента трения и интенсивности изнашивания при действии высоких нагрузок, что в свою очередь приводит к улучшению динамики изнашивания.

Во второй главе проведен анализ закономерности формирования износостойкости сопряжений скольжения, в том числе в паре «червяк – червячное колесо», на основе лабораторных сравнительных износных

испытаний стальных и бронзовых образцов при использовании разных составов смазочных материалов.

Червячные передачи преимущественно работают в условиях граничной и смешанной смазки и процесс проскальзывания витка червяка относительно зуба колеса имеет неравномерный характер за счет колебаний вращающего момента, что может быть смоделировано с помощью реверсивного перемещения поверхностей трения. Поэтому для лабораторных испытаний диссертантом выбрана машина трения МТ-8 возвратно-поступательного движения, которая гарантирует условия реверса и граничной смазки в «мертвых» точках. С учетом геометрических отличий червячной пары и пары лабораторных образцов, определен комплексный критерий подобия.

Были проведены сравнительные испытания стальных и бронзовых образцов, имитирующих червячную пару, по методике, соответствующей ГОСТ 23.224-86, при использовании индустриального масла И-20 А и того же масла с добавкой нанодисперсной суспензии серпентина в растворе солей жирных кислот (добавкой «Стрибойл»). Выбор индустриального масла И-20А связан с тем, что в данном смазочном материале отсутствуют присадки, что позволяет достоверно выявить эффективность наномодифицированной добавки. Марка стали – Ст20Х, образец закаленный и шлифованный до шероховатости  $Ra=0,63$ , марка бронзы – Бр05Ц5С5, без термообработки, с шероховатостью  $Ra=1,6$ .

С использованием аппарата планирования и регрессионного анализа экспериментов было определено, что фактор нагрузки может иметь весомость в сочетании с эффективностью действия смазочного материала. Однако, анализ зависимости интенсивности изнашивания от нагрузки и от вида смазочного материала, полученной по результатам лабораторных испытаний (в диапазоне нагрузок 1,6 МПа – 10 МПа), показал, что концентрация наномодифицированной добавки оказалась гораздо более существенным фактором, влияющим на интенсивность изнашивания, чем величина нагрузки.

Основной механизм изнашивания, протекающий в червячной передаче, представляет собой усталостный механизм изнашивания, действие которого снижается за счет формирования остаточной пленки. Твердые наноразмерные частицы, содержащиеся в добавке, в процессе механического взаимодействия с поверхностями трения, повышают свою химическую активность (механохимический эффект), которая увеличивается по мере роста нагрузки на сопряжение. В процессе роста нагрузки и уменьшения зазора между этими поверхностями увеличивается концентрация мицелл в зазоре и интенсивность их взаимодействия с поверхностями трения. Интенсивность изнашивания при этом уменьшается из-за роста эффективной вязкости области формирования пленки (пристеночного слоя), аналогично снижению интенсивности изнашивания на диаграмме Герси –Штрибека в области смешанной смазки при росте вязкости.

Третья глава посвящена экспериментальному подтверждению достоверности, выявленной закономерности формирования износостойкости сопряжений скольжения, в том числе в паре «червяк – червячное колесо».

Испытания проводили на стенде с червячными редукторами 5Ч-80, которые показали, что зависимость интенсивности изнашивания от давления имеет вид, аналогичный зависимости, полученной при лабораторных испытаниях, что подтверждает достоверность предложенной закономерности формирования износостойкости червячной передачи для диапазона контактных давлений (200–300 МПа) и выражается в виде упрощенной степенной зависимости.

Для оценки динамики изнашивания необходимо было выявить взаимосвязь интенсивности изнашивания с коэффициентом динамичности  $K_d$ , который определяется из экспериментальных зависимостей амплитуды колебаний момента на быстроходном валу для доминирующей частоты от тормозного момента. Для его оценки использовали показания тензодатчиков, установленных по стандартной схеме на элементах упругой подвески валов.

При исследовании колебаний анализ амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) осуществляли методом преобразования Фурье в компьютерной среде MATLAB. Коэффициент динамичности является случайной величиной и экспериментально через анализ АЧХ получали его распределение. Из полученной зависимости определили величину нагрузки, соответствующей максимальному (предзадирному) состоянию с  $K_d = 1,35$ .

В четвёртой главе описаны разработка уравнения динамики изнашивания и методика оценки параметрических границ триботехнической работоспособности червячной передачи с учетом температуры смазочного материала, скорости относительного скольжения червячной пары и роста нагруженности сопряжения.

Построены и проанализированы зависимости отношения предельного износа к модулю от тормозного момента, износа зуба червячного колеса от времени работы при разных составах смазочного материала, определены гамма-процентный ресурс при вероятности безотказной работы 50%, 80%, 90%, построены графики зависимости вероятности безотказной работы от тормозного момента, частоты вращения входного вала, температуры нагрева масла по критерию заедания в смазочных материалах без и с наномодифицированной добавкой, которые показали расширение параметрических границ работоспособности червячных передач.

В заключении сформулированы основные результаты и выводы диссертации.

### **Новизна научных результатов**

Научная новизна диссертационной работы заключается в выявлении закономерностей износа сопряжений скольжения на примере пары «червяк-червячное колесо» в присутствии наномодифицированного смазочного

материала и разработке математических моделей, учитывающих влияние смазочного материала на интенсивность изнашивания, динамику изнашивания червячной пары трения, ее ресурс, а также расширение параметрических границ триботехнической работоспособности червячных передач.

Из значимых научных результатов следует выделить:

1. Модель расчета изменения интенсивности изнашивания от нагрузки при использовании наномодифицированного смазочного материала, выраженная нелинейной степенной зависимостью.

2. Новое уравнение динамики изнашивания червячной передачи, учитывающее влияние роста коэффициента динамичности и состава смазочного материала.

3. Установленные параметрические границы триботехнической работоспособности червячных передач, учитывающие влияние температуры смазочного материала, скорости относительного скольжения червячной пары и роста нагруженности сопряжения.

**Значимость полученных автором диссертации результатов для развития машиностроительной отрасли** заключается в разработке новых научно обоснованных технических решений в области повышения износостойкости червячных передач, имеющих существенное значение для развития редукторной техники страны.

Теоретическая значимость результатов работы заключается в разработанных математических моделях, позволяющих оценить новую нелинейную закономерность изменения зависимости интенсивности изнашивания от нагрузки, влияющую на долговечность червячных передач, закономерности формирования процесса пленкообразования в поверхностном слое контактирующих деталей, разработке уравнения динамики изнашивания червячных передач, позволяющее прогнозировать параметрические границы триботехнической работоспособности в червячной паре трения.

Практическая значимость результатов работы заключается в технических предложениях и рекомендациях к проектированию червячных передач с экономически обоснованным и эффективным использованием наномодифицированных смазочных материалов, рекомендациях по проведению триботехнических испытаний червячных передач на износостойкость и долговечность, а также экспериментальной оценке параметрических границ триботехнической работоспособности червячных передач.

Практическая значимость результатов исследования подтверждается тем, что материалы диссертационной работы использовались для оценки эффективности новых смазочных материалов в механических передачах (ООО

«Купер»), а также приняты к использованию в учебном процессе кафедры РК-3 МГТУ им. Н.Э. Баумана при обучении специалистов по дисциплине «Трение и изнашивание механизмов. Смазочные материалы».

### **Конкретные рекомендации по использованию результатов и выводов, приведенных в диссертации**

В диссертационной работе разработаны модели и предложены алгоритмические методы и решения, направленные на доказательство эффективности использования наномодифицированной смазочной композиции, обладающей оптимальными антифрикционными и противоизносными свойствами, позволяющими существенно повысить срок службы червячных передач.

Критический анализ рецензируемой диссертации как квалификационной работы показывает, что в ней успешно решены поставленные задачи.

Следует отметить тот факт, что результаты теоретических исследований диссертационной работы Кулешовой Е.М. успешно используются при обучении специалистов по направлению 15.04.01 «Машиностроение».

Научные результаты работы могут быть рекомендованы для передачи в ведущие научно-исследовательские организации РФ, занимающиеся проблемами трения и изнашивания: ИПМех РАН, ВНИИ НП, Ростовский государственный университет путей сообщения, РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина.

### **Замечания по диссертационной работе:**

1. Полученная автором тенденция изменения интенсивности изнашивания от нагрузки связана с образованием защитной пленки из наномодифицированной добавки. Учитывался ли как-то вклад в процесс формирования этой пленки легирующих элементов, присутствующих в бронзе и стали?

2. В тексте диссертации не указаны границы концентрации применяемой наномодифицированной добавки к смазочному маслу, а также не определено ее оптимальное значение.

3. Учитывались ли в лабораторных испытаниях образцов на машине трения МТ-8 влияние коэффициента взаимного перекрытия  $K_{вз}$ , и если да/нет, то соответствовал ли он условиям, имеющим место в реальной червячной передаче?

4. Уравнение регрессии указывает на влияние на повышение износостойкости всего лишь одного фактора –  $X_2$ , представляющего собой толщину смазочной пленки, или косвенно, концентрацию нанодобавки. Почему не определялось ее оптимальное содержание?

Следует отметить, что приведенные замечания касаются, в первую очередь, полноты изложения, не ставят под сомнение справедливость

полученных результатов и выводов, не снижают научную ценность и не изменяют общую положительную оценку диссертационной работы.

**Заключение о соответствии диссертации критериям, установленным «Положением о присуждении ученых степеней», утвержденным постановлением Правительства Российской Федерации**

В соответствии с п. 9 диссертационная работа является научно-квалификационной работой, в которой изложены новые научно обоснованные технические решения и разработки, имеющие существенное значение для развития отечественных червячных редукторов.

В соответствии с п. 10 диссертация написана автором самостоятельно, обладает внутренним единством, содержит новые научные результаты и положения, выдвигаемые для публичной защиты, и свидетельствует о личном вкладе автора диссертации в науку. Диссертация содержит сведения о практическом использовании полученных автором диссертации научных результатов. Предложенные автором диссертации решения аргументированы, в диссертации содержатся сравнительные оценки этих решений с другими известными решениями.

В соответствии с п.п. 11 и 13 основные научные результаты исследований опубликованы в 14 трудах, из них 8 – в статьях из Перечня научных рецензируемых изданий ВАК, 1 статья входит в перечень, индексируемый Scopus и Web of Science. Количество публикаций, в которых излагаются основные научные результаты диссертации, соответствует требованиям на соискание ученой степени кандидата технических наук.

В соответствии с п. 14 диссертационная работа содержит ссылки на источники заимствования материалов и на работы других авторов.

**Заключение**

Диссертационная работа Кулешовой Екатерины Михайловны на тему «Повышение износостойкости червяных передач посредством применения наномодифицированного смазочного материала», представленная на соискание ученой степени кандидата технических наук, является законченной научно-квалификационной работой, содержащей новые научно обоснованные технические решения и разработки в области редукторостроения, имеющие существенное значение для развития отечественного машиностроительного производства.

Диссертационная работа по своему теоретическому уровню и практическому значению соответствует предъявляемым требованиям п.п. 9-14

«Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации, а ее автор Кулешова Екатерина Михайловна заслуживает присуждения ей ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.5.3. Трение и износ в машинах.

Диссертационная работа Кулешовой Екатерины Михайловны на тему «Повышение износостойкости червяных передач посредством применения наномодифицированного смазочного материала», доклад и автореферат были рассмотрены и обсуждены на заседании кафедры трибологии и технологий ремонта нефтегазового оборудования (Протокол № 04-24 от «11» апреля 2024 года), подготовленный отзыв обсужден и одобрен (Протокол № 05-24 от 14 мая 2024 г.)

Заведующий кафедрой трибологии и технологий ремонта нефтегазового оборудования РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина, д.т.н., профессор

  
Елагина Оксана Юрьевна  
14.05.2024

Профессор кафедры трибологии и технологий ремонта нефтегазового оборудования РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина, д.т.н., профессор

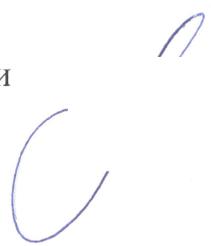
  
Малышев Владимир  
Николаевич 14.05.2024

Ученый секретарь:  
к.т.н., доцент

  
Вышегородцева Галина  
Ирековна. 14.05.2024

Подписи Елагиной О. Ю., Малышева В. Н.,  
Вышегородцевой Г. И. заверяю:

Начальник отдела кадров  
РГУ нефти и газа (НИУ) имени  
И.М. Губкина

  
Ю.Е. Ширяев

